

УДК 553.3 (571.55)

ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГРАВИТАЦИОННЫХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ (НА ПРИМЕРЕ ЮГО-ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ)

GEOLOGIC-GEOPHYSICAL MODEL OF THE ORE FIELD ON THE BASIS OF INTERPRETATION OF GRAVITY AND MAGNETIC FIELDS (ON THE EXAMPLE OF SOUTH-EASTERN TRANSBAIKALIE)



*Р.В. Груздев, Забайкальский государственный университет, г. Чита
rogruzdev@mail.ru*

R. Gruzdev, Transbaikal State University, Chita

Рассмотрена современная методика построения геолого-геофизических моделей на основе интерпретации потенциальных геофизических полей на примере одного из рудных месторождений скарнового золото-железо-медного промышленного типа юго-восточного Забайкалья. В основу интерпретации положена технология двумерной инверсии профильных многоуровневых данных магнито- и гравиразведки, систематизированных в единую трехмерную модель. Трехмерная модель представлена распределением магнитной восприимчивости и эффективной избыточной плотности в пределах изучаемого месторождения. В совокупности с имеющимися геологическими данными и результатами интерпретации потенциальных геофизических полей построена объемная геологическая модель, наглядно демонстрирующая геолого-структурные особенности исследуемого объекта. В результате математических преобразований получена модель аномальных значений магнитной восприимчивости и эффективной избыточной плотности, на основе которой выделен аномалиеобразующий объект. Выделенный объект, как предполагается, представлен совокупностью рудных тел. На следующем этапе обработки рассчитаны параметры аномалиеобразующего объекта (средние значения плотности и объем), благодаря которым произведен расчет прогнозных ресурсов по категории P_2 . Рассмотрены перспективы изучаемого месторождения, а также развитие методики дальнейшей интерпретации

Ключевые слова: геофизические методы исследования; потенциальные поля; двумерная инверсия; интерпретация; трехмерная модель; ресурсы; рудное месторождение; магнитная восприимчивость

On the example of one of the ore fields of skarn Au-Fe-Cu of industrial type of South-Eastern Transbaikalie, the modern technique of geologic-geophysical models creation on the basis of potential geophysical fields' interpretation is considered. The technology of two-dimensional inversion of the profile multilevel data of magnetic and gravity prospecting, structured in a single three-dimensional model is the basis for interpretation. The three-dimensional model is presented by distribution of magnetic susceptibility and effective excess density within the studied field. In accordance with available geological data and the results of potential geophysical fields' interpretation, the volume geological model is constructed. The model clearly demonstrates geological and structural features of the studied object. Then as a result of mathematical transformations, the model of anomaly values of a magnetic susceptibility and effective excess density on the basis of which the anomaly object is allocated is received. The allocated object as it is supposed is presented by a set of ore bodies. At the following stage of processing, parameters of anomaly object (average values of density and volume) thanks to which calculation of expected resources for the category P_2 is made, are calculated. The prospects of the studied field, and also development of a technique of further interpretation are considered

Key words: geophysical methods of research; modeling; two-dimensional inversion; interpretation; three-dimensional model; resources; ore deposit; magnetic susceptibility

В настоящее время построение трехмерных геолого-геофизических моделей стало востребованной процедурой в рамках общего процесса разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Несмотря на богатейшие традиции геологической науки России, построение трехмерных геологических моделей месторождений является в нашей стране относительно молодым направлением, которое возникло около 20 лет назад [6]. Исторически сложилось, что большинство геолого-геофизических моделей разрабатывались именно для нефтяных и газовых месторождений и гораздо реже — для рудных объектов [4]. Под моделью можно понимать обобщенное и формализованное представление об основных геологических и геофизических характеристиках изучаемого объекта.

Процесс моделирования имеет множество плюсов, в первую очередь в том, что может применяться на любой стадии геолого-разведочных работ, начиная с этапа поисков и заканчивая эксплуатацией месторождения. Важна и высокая эффективность использования объемных цифровых моделей, обусловленная тем, что они, кроме хорошей наглядности и информативности, имеют большой прогностический потенциал, позволяя дать прогноз уже на первых стадиях геолого-разведочных работ. Однако любое моделирование характеризуется осреднением входных физических параметров, что в какой-то мере идеализирует или упрощает геологическую среду, создавая более благоприятные условия для проведения расчетов. Таким образом, уже на первом этапе моделирования происходит отход от реально существующей геологической обстановки к осредненной упрощенной модели среды, что может сказаться на результатах прогноза.

1. Краткая геологическая характеристика

Исследуемая рудоносная площадь характеризуется сложным геологическим строением, широким распространением разновозрастных и различных по составу магматических и осадочных пород (рис. 1). Структура расположенного здесь месторождения определена морфологи-

Несомненно, что плюсов в цифровом моделировании геологических объектов гораздо больше, чем минусов, и даже весьма схематичная и недостаточно информационно обоснованная геолого-геофизическая модель дает в руки исследователю качественно иное отображение всей совокупности привлеченной для ее создания информации.

В Забайкалье основой минерально-сырьевой базы служат месторождения рудных полезных ископаемых. В процесс моделирования должны быть положены принципы и методология построения трехмерных геолого-геофизических моделей для рудных месторождений. Однако моделирование в этой области до сих пор не имеет четкого алгоритма и жестких правил построения. Отсутствие единой методики моделирования вполне объяснимо, так как любое месторождение уникально по своим геолого-геофизическим критериям и прочим признакам.

Подход к моделированию зависит не только от генезиса месторождения, его морфологических признаков, но и от стадии геолого-разведочных работ. Разделение моделей в зависимости от этапов и стадий геолого-разведочных работ является наиболее принципиальным, так как каждый этап подразумевает более детальное построение и коррекцию модели благодаря появлению новой достоверной информации.

В отечественной литературе это направление стремительно развивается, поэтому любое исследование в данной области, несомненно, является актуальным. Таким образом, на примере одного из рудных месторождений скарнового золото-железо-медного типа юго-восточного Забайкалья рассмотрена методика построения геолого-геофизической модели.

ей гранит-порфиров, которые образуют силлообразное тело, конформное со слоисто-складчатыми образованиями вмещающей рамы, сложенной породами терригенно-карбонатной формации. Тип оруденения скарновый золото-железо-медный.

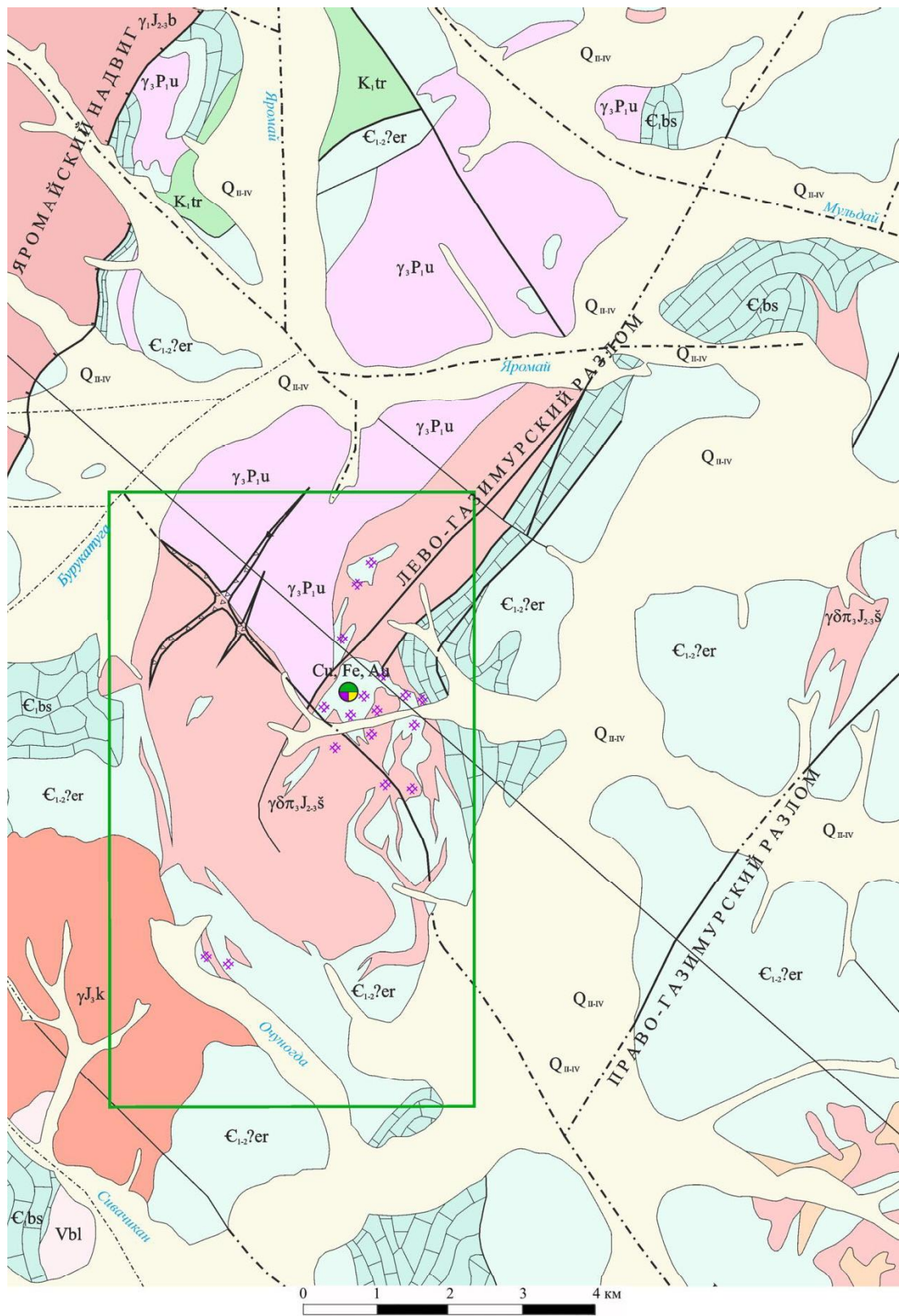
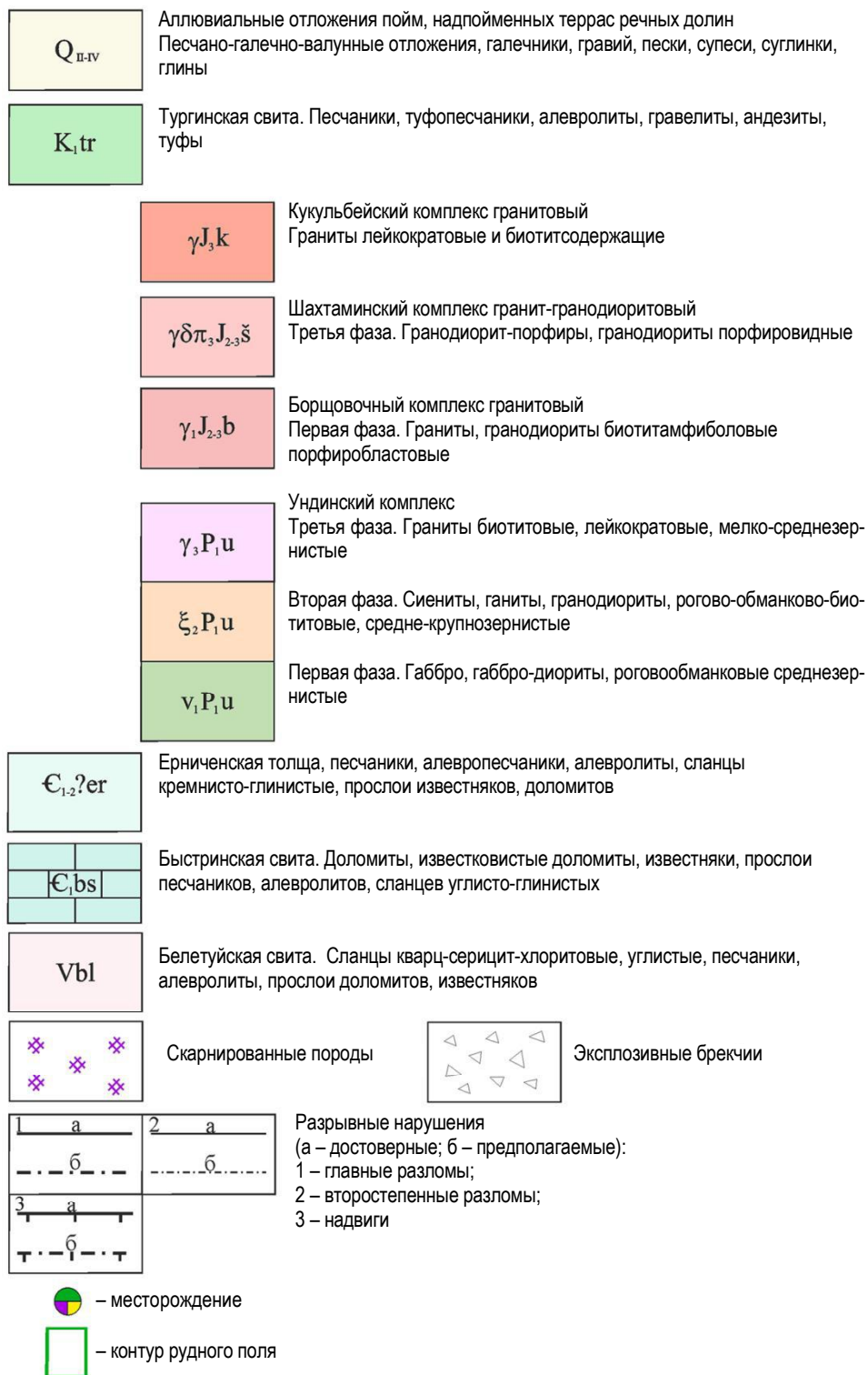


Рис. 1. Схема геологического строения скарнового золото-железо-медного месторождения, расположенного в ЮВ части Забайкалья



Выбор рассматриваемого месторождения неслучаен. Скарновые месторождения контрастно выделяются в геофизических полях, в магнитном, как правило, за счет аномальной магнитной восприимчивости,

которая у магнетитовых скарнов варьирует от $2000 \dots 6000 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, а в гравитационном – за счет аномальной плотности от 3 т/м^3 и более. Магнитная восприимчивость у гранит-порфиров порядка $300 \dots 350 \cdot 10^{-5}$ ед.

СИ, плотность 2,62 т/м³. Карбонатные породы представлены преимущественно известняками, которые имеют плотность 2,71...2,75 т/м³. Таким образом, за счет

аномальных петрофизических свойств объекта интерпретация геофизических данных может носить не только качественный, но и количественный характер [5].

2. Физические основы методики интерпретации потенциальных геофизических полей

Особое место в изучении рудных объектов занимают геофизические методы исследования, которые позволяют дистанционно, без механического вмешательства, изучить геологическое строение объекта [1]. Наиболее эффективными геофизическими методами повышенной информативности являются потенциальные поля, прежде всего, гравитационное и магнитное. Важной особенностью потенциальных полей является их интегральный характер и возможность отражать размещение на различных глубинах объектов, обладающих аномальными свойствами. С одной стороны, эта особенность является одной из причин неоднозначности при интерпретации данных гравиметрии и магнитометрии. В то же время интегральная природа потенциальных полей позволяет разделить их на составляющие, характеризующие распределение эффективной плотности и магнитной восприимчивости на определенных глубинных уровнях.

При проведении гравиразведочных и магниторазведочных работ на рудных объектах ЮВ Забайкалья исследователи убедились в эффективности потенциальных геофизических методов. Эти методы успеш-

но способствуют решению таких задач, как геологическое картирование, выявление и изучение рудоносных складчатых структур, рудоконтролирующих структурных элементов, обнаружение и прослеживание рудоконтролирующих и рудовмещающих тектонических нарушений [11; 12]. Более того, магниторазведочные работы выступают как прямой метод поисков месторождений скарнового типа.

В совокупности оба метода несут полезную информацию, позволяя качественно оценить геологическую обстановку, в том числе выделить перспективные объекты. Однако количественная интерпретация – это более трудоемкий процесс, связанный с решением прямой и обратной задач геофизики. Как уже отмечалось, этот процесс не имеет однозначного решения.

Развитие математических методов обработки и компьютерных технологий позволяет совершенствовать методы интерпретации геофизических исследований. Тем самым не только повышает качество интерпретации, но и решает часто возникающий вопрос потребности оперативной обработки и интерпретации геофизических материалов [9].

3. Построение трехмерной модели интерпретации

На первом этапе обработки сначала производится двумерная инверсия профилей, на которых выполнены геофизические исследования [10]. Для всех профилей применяются единые параметры и настройки инверсии. Программа позволяет корректировать параметры модели, редактировать модель, а также экспортировать ее в другие программные продукты для дальнейшей интерпретации. При инверсии максимальная глубина нижнего слоя выбрана 2250 м, что практически всегда удовлетворяет исследователей горняков при изучении глубинного

строения рудных месторождений. В результате двумерной инверсии получены разрезы, характеризующие распределение эффективных значений плотности и магнитной восприимчивости, следовательно, структурно-вещественных неоднородностей в нижнем полупространстве.

Дальнейшая интерпретация заключается в том, что результаты инверсии собираются в единую базу данных, содержащую информацию со всех профилей наблюдений. Таким образом, имея матрицу значений физических параметров объекта в

трехмерном пространстве, можем построить объемную геофизическую модель [8]. Ряд исследователей считает, что правильно называть такие модели 2,5 D, так как при интерпретации производится профильная двумерная обработка данных, однако при качественной увязке данных интерпретации допускается позиционировать модель как трехмерную.

Трехмерное моделирование производится в специализированных программах,

оснащенных мощным вычислительным аппаратом. На первом этапе, согласно общим правилам построения трехмерных моделей, подбирается размер ячейки, задается эллипсоид анизотропии, затем для анализа и моделирования пространственной корреляции строится вариограмма. Когда большинство параметров соответствуют требованиям моделирования, вариограмма может выглядеть следующим образом (рис. 2).

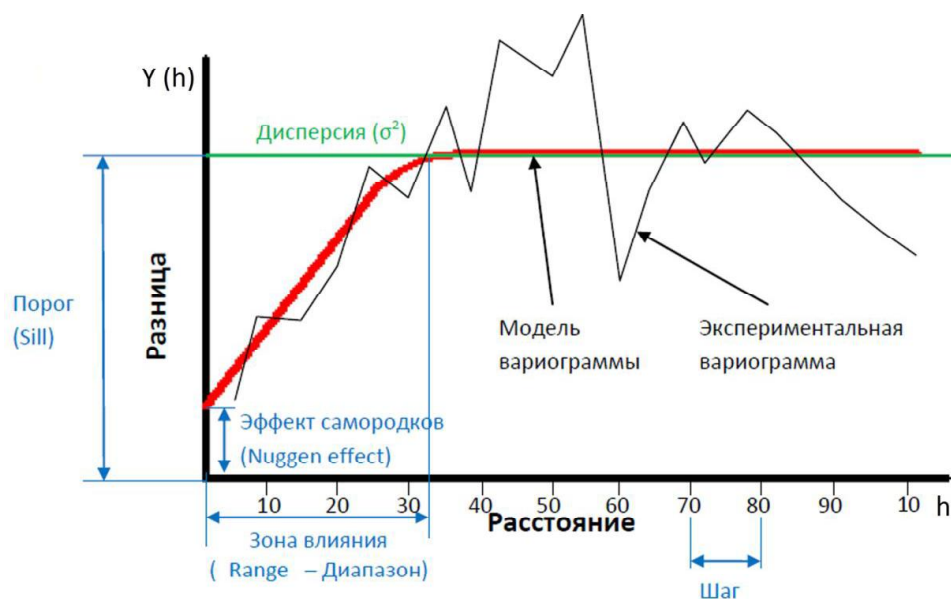


Рис. 2. Пример вариограммы при построении трехмерной модели интерпретации геофизических данных

На следующем этапе обработки производится построение воксельной модели которая подразумевает распределение физического параметра в трехмерном пространстве. После построения воксельной модели, верхняя часть срезается гридом, содержащим топографические данные местности, для отображения реального рельефа исследуемой территории. Конечная обработка сводится к подбору цветовой шкалы согласно интенсивности физического параметра [9]. В связи с тем, что данные исследования могут нести коммерческую информацию, результаты представлены в условном уровне, без пространственной привязки к координатной сети.

В результате интерпретации данных гравиразведки и магниторазведки и после-

дующего моделирования построены воксельные модели избыточной плотности и магнитной восприимчивости (рис. 3).

Трехмерные модели обладают высокой информативностью, в режиме редактирования можно получать разрезы в заданном направлении, срезы по интересующему горизонту, а также строить изоповерхности физического параметра модели. Воксельные модели наглядно отображают распределение плотностных неоднородностей и объектов с аномальной магнитной восприимчивостью, что открывает широкие возможности дальнейшего истолкования природы аномальных объектов. Однако следует помнить, что результаты моделирования могут быть неоднозначны и отличаться от реально существующей геологической обстановки.

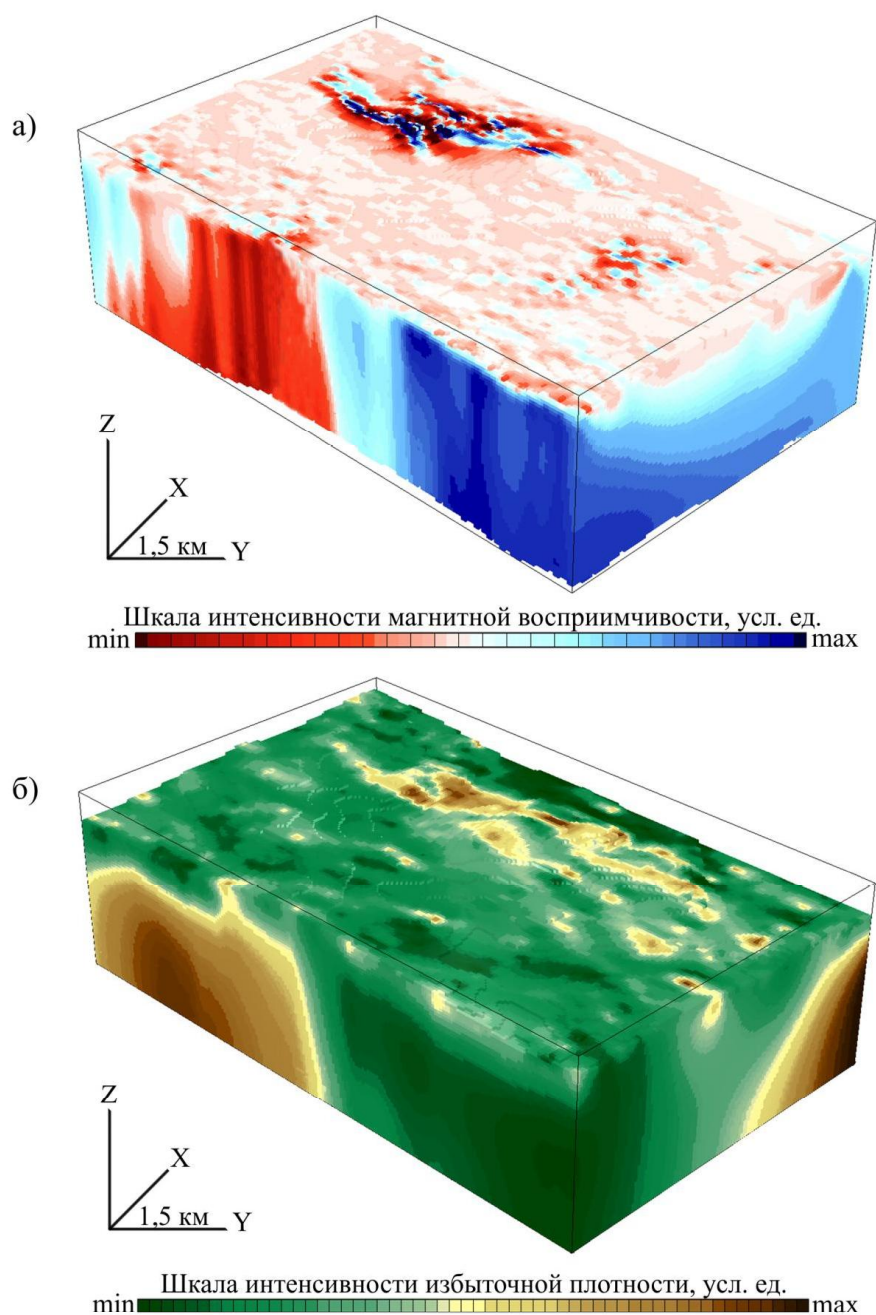


Рис. 3. Трехмерная модель распределения магнитной восприимчивости (а) и эффективной избыточной плотности (б)

Благодаря методике осреднения и фильтрации результатов воксельной модели, можно попробовать выделить аномалиеобразующий объект в трехмерном пространстве [2]. В основу такой обработки положено математическое осреднение трехмерной модели скользящим кубом со стороны, позволяющей получить среднее

арифметическое значение в каждой ячейке вокселя. Этот подход широко известен и применяется при выделении локальных или остаточных аномалий трансформации потенциальных полей [3; 12]. При работе с объемными моделями расчет трансформант потенциального поля крайне усложнен, поэтому часто сопровождается процедурой

фильтрации данных. Благодаря длительному трудоемкому процессу математических расчетов, удается выделить аномалиеобразующий объект, представленный в трехмерном пространстве.

Интерпретация моделей эффективной плотности и магнитной восприимчивости в трехмерном пространстве позволяет коррелировать и сопоставлять результаты обработки (рис. 4).

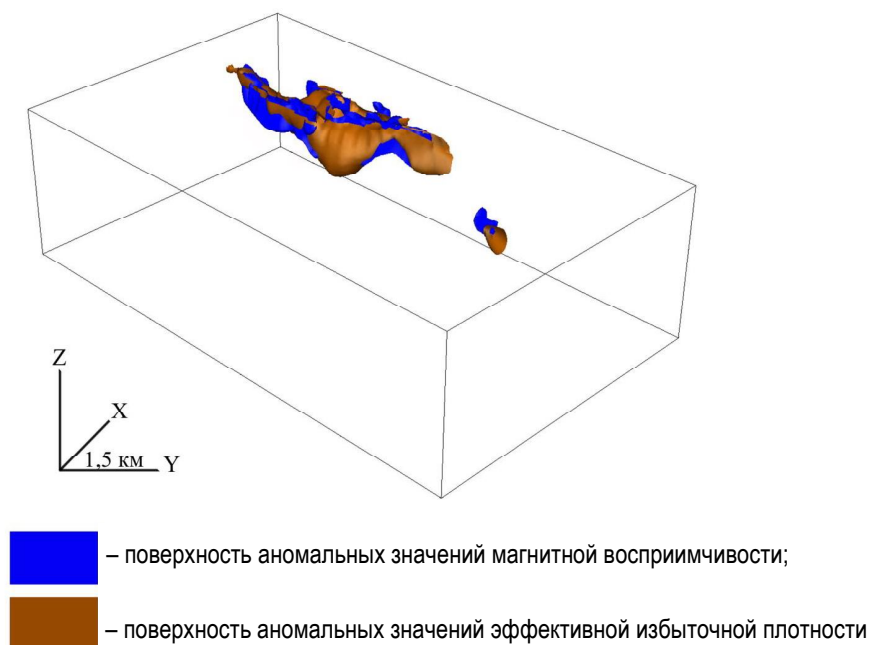


Рис. 4. Трехмерная модель аномальных значений магнитной восприимчивости и эффективной избыточной плотности

На рис. 4 геофизическими методами выделяется контур аномалиеобразующего объекта, границы которого не всегда совпадают, но большая часть взаимных пересечений позволяет утверждать, что такой

подход к интерпретации потенциальных геофизических полей может иметь место в современной обработке геофизических данных.

4. Построение трехмерной геолого-геофизической модели

Следующий этап обработки считается наиболее ответственной стадией моделирования, так как полученные модели интерпретации необходимо наделить геологическим описанием, а также определить природу аномальных объектов. В процессе создания геологической модели привлекается большое количество информации о объекте моделирования, что позволяет обобщить и формализовать основные структурные элементы, приблизившись к упрощенной модели интерпретации геологической среды.

Благодаря взаимной корреляции физических свойств и параметров объектов,

сопоставления выделенных аномалий с геологической картой, удастся получить геолого-геофизическую модель интерпретации, которая наглядно демонстрирует геологическую обстановку месторождения (рис. 5).

На этапе поисков и разведки месторождений рудных полезных ископаемых построение трехмерных геолого-геофизических моделей интерпретации играет огромную роль как в данный момент работ, так и для выбора будущей стратегии планирования разведочного процесса.

В первую очередь модель позволяет оценить прогнозный потенциал месторождения. Подход к оценке прогнозных ре-

сурсов, к примеру категории P_2 , по модели геолого-геофизической интерпретации становится более обоснованным и экспрес-

сивным. Более того, привлечение новых достоверных данных позволяет корректировать модель в автоматическом режиме.

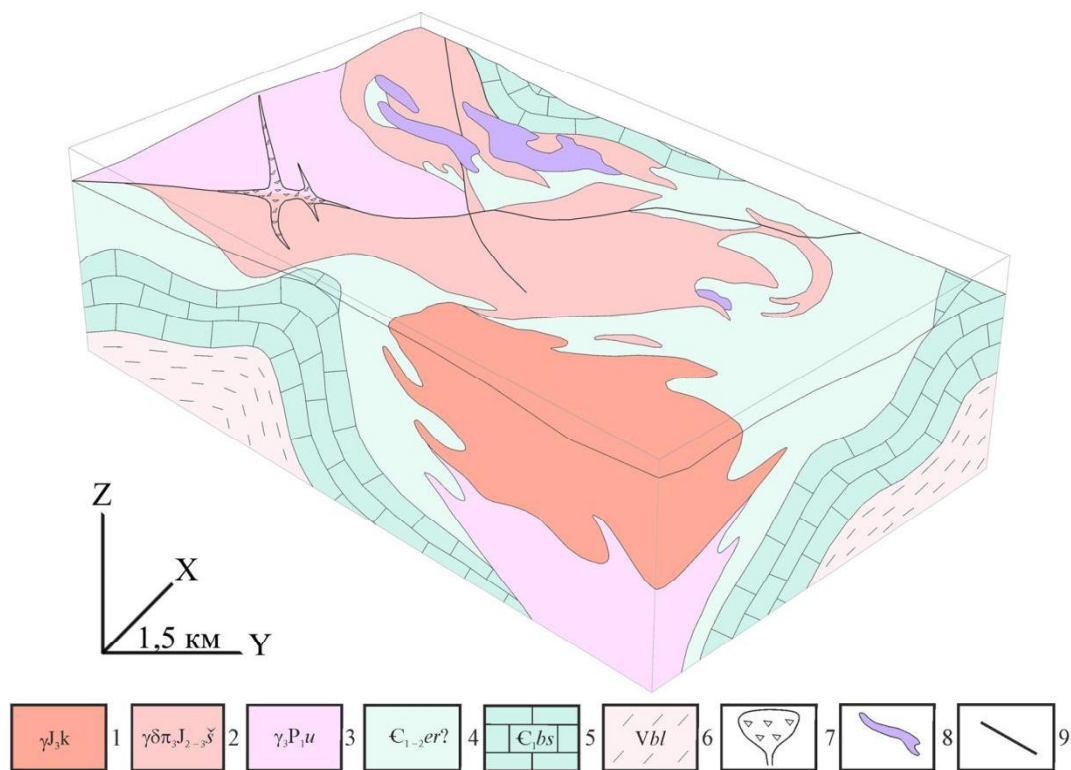


Рис. 5. Трехмерная геолого-геофизическая модель по данным интерпретации:

- 1 – Кукульбейский комплекс. Граниты лейкократовые;
- 2 – Шахтаминский комплекс. Гранодиорит-порфиры;
- 3 – Ундинский комплекс. Граниты;
- 4 – Аргунская серия, ерниченская толща. Алевролиты, песчаники;
- 5 – Аргунская серия, быстринская свита. Известняки;
- 6 – Белетуйская свита. Кристаллические сланцы;
- 7 – взрывные брекчи;
- 8 – проекция приповерхностных аномалиеобразующих объектов;
- 9 – разрывные нарушения

На примере данного месторождения произведем расчет его прогнозных ресурсов по категории P_2 . Ранее выделенная аномальная изоповерхность с плотностью более 3 т/м^3 заключает в себе объем, который отражает совокупность рудных объектов. Этот объем рассчитывается автоматически в программном модуле интерпретации. По результатам бурения хотя бы одной скважины, проходящей через выделенный аномальный объем, можно рассчитать процентный коэффициент рудоносности, который отражает фактическое соотношение рудных интервалов к выделенному объекту по интерпретации.

На данном месторождении средний коэффициент рудоносности равен 11 %. Таким образом, объем руды будет рассчитан по формуле

$$V_{(руды)} = V_{(аномального\ объекта)} \cdot K_{(рудоносности)}$$

где $V_{(аномального\ объекта)}$ – объем аномального объекта, выделенный по данным интерпретации,

$K_{(рудоносности)}$ – коэффициент рудоносности.

Затем прогнозные ресурсы можно рассчитать следующим образом:

$$Q(P_2) = V_{(руды)} \cdot D,$$

где D – среднее значение плотности руды.

С учетом целесообразности извлечения при современном состоянии экономики и техники ограничим глубину расчета до 300 м. Соответственно, произведя расчеты, прогнозные ресурсы по категории P_2 на данном объекте приблизительно могут составлять 165,24 млн т руды.

Практическую значимость имеет возможность ресурсов для всего объема, не ограничиваясь глубиной расчета, что раскрывает широкие возможности и высокий потенциал месторождения. Перспективы расчетов на этом не заканчиваются, зная средние содержания полезных компонентов в руде, по данным бурения скважин или других источников информации, можно рассчитать прогноз количества каждого полезного компонента, содержащегося в выделенном объеме.

Выводы

1. На примере рассматриваемого месторождения ЮВ Забайкалья впервые проведена комплексная двумерная интерпретация грави- и магниторазведочных работ с помощью пакета программ ZondMag2d.

2. На основе полученных результатов интерпретации построена трехмерная модель распределения магнитной восприим-

чивости и эффективной избыточной плотности.

3. По результатам интерпретации построена объемная геолого-геофизическая модель скарнового золото-железо-медного месторождения.

4. Выделен обобщенный контур аномальных значений магнитной восприимчивости и эффективной избыточной плотности, который, как предполагается, может повторять форму аномалиеобразующего объекта.

5. По совокупности выделенных критериев определены параметры месторождения, на основании которых рассчитаны прогнозные ресурсы категории P_2 .

6. Рассмотрена возможность прогнозирования запасов интересующего полезного компонента (при наличии его процентного содержания в руде).

7. Подобная интерпретация носит зачастую нетривиальный характер, однако полученные результаты свидетельствуют о том, что такой подход к интерпретации потенциальных геофизических полей может иметь место в современной обработке геофизических данных.

Список литературы

1. Ажгирей Г.Д., Берешенкова Б.К., Прокофьева А.П. Методы поисков и разведки полезных ископаемых. М.: Госгеолтехиздат, 1954. 463 с.
2. Бисеркин И.А., Федотов В.А. Детализация плотностной модели с помощью алгоритма многопризнаковой фильтрации // Геоинформатика. 2013. № 3. С. 25–29.
3. Булах Е.Г. О выделении регионального фона при интерпретации гравитационных и магнитных аномалий // Изв. АН СССР, Физика Земли. 1979. № 2. С. 95–99.
4. Бычков С.Г. Современные технологии интерпретации гравиметрических данных при исследованиях на нефть и газ: материалы междунар. конф. и науч. сессии Горного института УрО РАН. Пермь, 2005. С. 1–22.
5. Вахрамеев Г.С. Основы методологии комплексирования геофизических исследований при поисках рудных месторождений. М.: Недра, 1976. 152 с.
6. Гладков Е.А. Методология создания трехмерной геолого-технологической модели на месторождениях с историей разработки более 50 лет // Бурение и нефть. 2011. № 1. С. 32–35.
7. Грошон Р.Ш. 3-Д Структурная геология. Университет Алабамы, 2006. 453 с.
8. Долгалъ А.С. Аппроксимация геопотенциальных полей эквивалентными источниками при решении практических задач // Геофизический журнал. 1999. Т. 21. № 4. С. 71–80.
9. Интерпретация комплексных данных методами распознавания и классификации в автоматизированной системе обработки аэрогеофизических материалов / Л.А. Коваль, И.И. Приезжев, В.В. Овчаренко [и др.] // Геология и геофизика. 1985. № 5. С. 44–52.
10. Каминский А.Е. Инструкция к программе ZONDMAG2D. СПб., 2010. 49 с.
11. Логачев А.А., Захаров В.П. Магниторазведка. Ленинград: Недра, 1979. 126 с.
12. Мудрецова Е.А., Веселов К.Е. Гравиразведка. Справочник геофизика. М.: Недра, 1990. 607 с.

List of literature

1. Azhgirey G.D., Bereshenkova B.K., Prokofiev A.P. *Metody poiskov i razvedki poleznykh iskopaemykh* [Methods of prospecting and mineral exploration]. Moscow: State scientific and technical publishing house of literature and conservation of resources, 1954. 463 p.
2. Biserkin I.A., Fedotov V.A. *Geoinformatika* (Geoinformatics), 2013, no. 3, pp. 25–29.
3. Bulakh E.G. *Izv. AN SSSR, Fizika Zemli* (Math. USSR Academy of Sciences, Physics of the Earth), 1979, no. 2, pp. 95–99.
4. Bychkov S.G. *Sovremennye tehnologii interpretatsii gravimetricheskikh dannykh pri issledovaniyakh na neft i gaz* (Modern interpretation of gravity data technology at oil and gas research): Proceedings of the international. conf. and scientific. session of the Mining Institute, Ural Branch of Russian Academy of Sciences. Perm, 2005, pp. 1–22.
5. Vakhromeev G.S. *Osnovy metodologii kompleksirovaniya geofizicheskikh issledovaniy pri poiskakh rudnykh mestorozhdeniy* [Basics of methodology of integration of geophysical research in the search for ore deposits]. Moscow: Nedra, 1976. 152 p.
6. Gladkov E.A. *Burenie i neft* (Drilling and oil), 2011, no. 1, pp. 32–35.
7. Groshon R.Sh. *3-D Strukturnaya geologiya* [3-D Structural Geology]. University of Alabama, 2006. 453 p.
8. Dolgal A.S. *Geofizicheskii zhurnal* (Geophysical journal), 1999, vol. 21, no. 4, pp. 71–80.
9. Koval L.A., Priezzhaev I.I., Ovcharenko V.V. [et al.] *Geologiya i geofizika* (Geology and Geophysics), 1985, no. 5, pp. 44–52.
10. Kaminsky A.E. *Instruktsiya k programme ZONDMAG2D* [Instruction to the ZONDMAG2D program]. St. Petersburg, 2010. 49 p.
11. Logatchev A.A., Zakharov V.P. *Magnitorazvedka* [Magnetic survey]. Rostov: Nedra, 1979. 126 p.
12. Mudretsova E.A., Veselov K.E. *Gravirazvedka. Spravochnik geofizika* [Gravity. Directory of Geophysics]. Moscow: Nedra, 1990. 607 p.

Коротко об авторе

Briefly about the author

Груздев Роман Викторович, аспирант, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия. Область научных интересов: структуры рудных полей и месторождений, интерпретация потенциальных геофизических полей
rogruzdev@mail.ru

Roman Gruzdev, postgraduate student, Transbaikal State University, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: structures of ore fields and deposits, interpretation of potential geophysical fields

Образец цитирования

Груздев Р.В. Геолого-геофизическая модель рудного месторождения на основе интерпретации гравитационных и магнитных полей (на примере юго-восточного Забайкалья) // Вестн. Забайкал. гос. ун-та. 2016. Т. 22. № 5. С. 4–14.

